

Opinnäytetyö (AMK)  
Elektroniikka  
Elektroniikkasuunnittelu  
2015

Valtteri Sjöblom

# ANTURIPROTOLAITE SMART FACTORY -TUOTANNON- VALVONTAJÄRJESTELMÄÄN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkasuunnittelu

2016 | 34

Timo Tolmunen

Valtteri Sjöblom

## ANTURIPROTOLAITE SMART FACTORY -TUOTANNONVALVONTAJÄRJESTELMÄÄN

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on valmistaa laiteprototyyppi, jolla testataan kiihtyvyys- ja muiden anturien toimivuutta ja käyttöä tuotantokoneissa. Anturien tarkoituksena on tuottaa dataa tehtaiden automaattista valvontaa varten esimerkiksi koneiden käyttöasteen parantamiseksi ja valmistuvien tuotteiden laadun mittaamiseksi.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on mekaniikan ja elektroniikan sopimusvalmistukseen erikoistunut monikansallinen yhtiö Stera Technologies Oy. Työ liittyy yrityksen kehityksessä olevaan Smart Factory -tuotannonvalvontajärjestelmään.

Työssä testattiin kiihtyvyysanturin käyttöä levytyökeskuksessa, infrapuna-anturin ja MEMS-mikrofonin toimintaa, Li-Po-akun riittävyttä ja latausta sekä erilaisia kommunikaatorajapintoja. Testauksia varten rakennettiin prototyyppi, johon suunniteltiin kytkennät ja piirrettiin piirilevykuvat valittuun koteloon sopivaksi.

Valmistetun protolaitteen avulla testatuista asioista saatiin runsaasti tietoa systeemin jatkokehitystä varten. Antureille löydettiin monia käyttökohteita, kuten iskujen laskeminen, tuotantokoneiden yleisen käyttöasteen mittaaminen, koneen liikkuvuus, valmistuvien kappaleiden laskeminen ja yleisen taustamelu- ja valotason mittaaminen. Työn pohjalta saatiin myös uusia ideoita jatkokehitykseen.

Tämä työ osoitti myös ongelmakohtia, joihin voidaan jatkossa kiinnittää huomiota. Näitä olivat esimerkiksi kiihtyvyysanturin tuottaman datan määrä, RF-suunnittelun tärkeys ja akun suojaus.

### ASIASANAT:

elektroniikka, anturit, akut, heikkovirtatekniikka, piirilevyt, valvontalaitteet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Design

2016 | 34

Timo Tolmunen

Valtteri Sjöblom

## SENSOR PROTO DEVICE TO “SMART FACTORY” PRODUCTION MONITORING SYSTEM

The goal of this bachelor's thesis is to manufacture a proto device, which allows the testing and usage of an accelerometer and other types of sensors in production machines. The purpose of the sensors is to produce automatically data that can be used to improve the utilization rate of the machines, and to measure the quality of manufactured products.

This thesis has been called by a multinational company specialized in contract manufacturing of mechanics and electronics named Stera Technologies Oy. This thesis relates to a research and development of a production monitoring system called Smart Factory.

Things tested in the thesis are the usage of accelerometer in a punching machine, the operation of an infrared sensor and a MEMS microphone, charging and sufficiency of a Lithium-Polymer battery, and a few different communication interfaces. For the tests a prototype device was assembled, for which a schematic diagram and a layout picture were drawn and produced as a PCB.

The vast amount of information gained from the tested things influences further development of the system. Many different kind of uses were defined, such as the counting of shock impulses, utilization rate measuring, mobility of devices, counting the amount of finished products, and overall background noise and light level measuring. This thesis also brought up new ideas for further development.

A number of problems that need to be revised, was found during the making of this thesis. These were in example the protection of the battery, the importance of a proper RF-design and the amount data an accelerometer can produce.

### KEYWORDS:

electronics, sensors, batteries, low-current technology, PCBs, monitoring equipment

# SISÄLTÖ

<b>LYHENTEET</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 STERA JA SMART FACTORY -JÄRJESTELMÄ</b>	<b>8</b>
<b>3 PROTOKORTTI</b>	<b>10</b>
3.1 Anturit	10
3.1.1 Digitaalinen kiihtyvyyssanturi (MMA8652FC)	11
3.1.2 Audiosensori (MP23AB02B)	13
3.1.3 Infrapuna-anturi (SFH325FA)	14
3.2 Kommunikaatorajapinnat	15
3.2.1 I <sup>2</sup> C	15
3.2.2 UART	17
3.2.3 IEEE 802.15.4	19
3.3 Teholähde	21
3.4 Kytkenäkaavio	21
3.5 Layout	24
<b>4 PROTOTYYPIN KOKOAMINEN</b>	<b>26</b>
<b>5 OHJELMA</b>	<b>27</b>
<b>6 MITTAUKSET</b>	<b>29</b>
<b>7 POHDINTA</b>	<b>32</b>
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>34</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>35</b>

## LIITTEET

Liite 1. KytKentäkaaviot

Liite 2. Layout

Error! Bookmark not defined.

## KUVAT

Kuva 1. Oskilloskooppikuva tinaimuriaseman värähtelystä.	10
Kuva 2. MMA8652FC:n lohkokaavio [3].	11
Kuva 3. MMA8652FC:n toimintamoodi [3].	12
Kuva 4. I <sup>2</sup> C-väylän ajoitusdiagrammi [6].	16
Kuva 5. MMA8652FC-piirin yhden rekisterin lukusekvenssi, jossa ST tarkoittaa aloituskonditiota, W kirjoitusbittiä, R lukubittiä, AK kuittausta, NAK kuittauksen puuttumista, SR uudelleenaloituskonditiota ja SP lopetuskonditiota [3].	16
Kuva 6. UARTin kehysformaatti [6].	17
Kuva 7. IEEE 802.15.4 runkoformaatti [6].	19
Kuva 8. IEEE 802.15.4 MAC-tason rakenne [6].	20
Kuva 9. Proto koottuna.	26
Kuva 10. Data Visualizer –ohjelman alustus.	30

## KUVIOT

Kuvio 1. MP23AB02B:n taajuusvaste [4].	14
Kuvio 2. SFH324FA-fototransistorin suhteellinen herkkyys valon aallonpituuden funktiona [5].	14
Kuvio 3. TPS62203-hyötysuhde kuormavirran funktiona [12].	22
Kuvio 4. MMA8652FC-kiihtyvyysanturin kiihtyvyysdatan lukemisen prosessikaavio.	27
Kuvio 5. Levytyökeskuksen kylkeen kiinnitetyn kiihtyvyysanturin z-akselin dataa, pystyakselilla mg-voimat ja vaakakselilla sekunnit.	30
Kuvio 6. Kuvion 5 tarkennus ajasta 1 904 s – 1 905 s, pystyakselilla mg-voimat ja vaakakselilla sekunnit.	31

## TAULUKOT

Taulukko 1. MMA8652FC:n näytetaajuuden (ODR) ja ylinäytteistyskonfiguraation vaikutus virrankulutukseen [3].	13
Taulukko 2. Siirtonopeuden vaikutus virheprosenttiin eri kellotaajuuksilla [6].	18
Taulukko 3. teholahteen kapasiteetti tilavuuden suhteen [9].	21

## LYHENTEET

AD	Analog to Digital eli analogi-digitaali-muunnin
CTS	Clear to Send eli vapaa lähettää
DFN	Dual Flat No-lead, eli kaksisivuinen litteä johdoton paketti
FCS	Frame Check Sequence eli kehystarkastussekvenssi
FIFO	First-In First-Out eli ensimmäinen sisään, ensimmäinen ulos -puskuri
IC	Integrated Circuit eli integroitu virtapiiri
I/O	Input / Output eli sisääntulo / ulostulo
MAC	Media Access Control eli liikennöinnin kontrollointijärjestelmä
MEMS	Microelectromechanical system eli mikroelettromekaaninen systeemi
ODR	Output Data Rate eli näytteenantonopeus
OQPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying eli quadratuuri-vaiheavainnus
PAN	Personal Area Network eli likiverkko
PCB	Printed Circuit Board eli piirilevy
QFN	Quad Flat No-leads eli nelisivuinen litteä johdoton paketti
RTS	Request to Send eli lähetyksen pyyntö
SMD	Surface-Mounted Device eli pintaliitoskomponentti
SPI	Serial Peripheral Interface eli sarjajärärajapinta
SPL	Sound Pressure Level eli äänipaineen taso
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter eli yleinen asyntoninen lähetin-vastaanotin
USB	Universal Serial Bus eli yleinen sarjavyä

# 1 JOHDANTO

Nykypäivän monenlaisissa tehtaissa tuottavuutta, laatua ja käyttöastetta halutaan mitata mahdollisimman tarkasti ja monipuolisesti ilman suuria kustannuksia. Erityisesti tehtaissa, joissa tuotantovolyymit ovat merkittävän suuret, automaattiset tuotannon valvontalaitteet tuovat tarkkuutta statistiikkaan sekä vähentävät valvontaan tarvittavan henkilöstön määrää. Näin henkilöstökustannukset pienenevät tai henkilöstöä voidaan allokoida muihin tehtäviin. Jotta hyöty pienemmästä henkilöstöstä vaikuttaisi yhtiön talouteen merkittävästi, valvontalaitteiden tulisi olla edullisia ja pitkäikäisiä ja niillä tulisi olla pieni energiankulutus.

Stera Technologies Oy on aloittanut projektin, joka liittyy tehtaidensa tuotantokoneiden automaattiseen valvontaan koneiden käyttöasteiden parantamiseksi ja valmistuvien tuotteiden laadun mittaamiseksi. Valvonnasta kerättävää dataa voidaan käyttää tarvittaessa muihinkin tarkoituksiin, joita saattaa ilmetä projektin edetessä pidemmälle.

Erilaisia mittausantureita, datanhallinnan sovelluksia sekä molemmat sisältäviä paketteja on markkinoilla useita, mutta niiden hinta on tyypillisesti huomattavan korkea. Valmiiden tuotteiden käyttäminen olisi kallista, sillä Stera Technologies Oy:llä on seitsemän tehdasta, joissa on monia eri koneita. Oman valvontalaitteiston kehitys on siis Steralle järkevää. Jos laitteistosta saadaan edullinen ja hyvin toimiva, sillä voi olla myös laajempia markkinoita.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on valmistaa protolaite, jolla testataan kiihtyvyys- ja muiden anturien toimivuutta ja käyttöä tuotantokoneissa. Lopullisena tarkoituksena on tuottaa dataa valvontaa varten analysoitavaksi ja esittää jatkokehitysehdotuksia ja -ideoita.

Täysin vastaanvanlaista opinnäytetyötä ei löydy pikaisen etsinnän tuloksena, mutta läheltä asiaa löytyy esimerkiksi kiihtyvyysantureita käsittelevä opinnäytetyö ”MSP430 ja kiihtyvyysanturi” (Heikkinen 2012) [16].

## 2 STERA JA SMART FACTORY -JÄRJESTELMÄ

Opinnäytetyön toimeksiantaja on mekaniikan ja elektroniikan sopimusvalmistukseen erikoistunut yhtiö Stera Technologies Oy, jolla on kirjoitushetkellä viisi tehdasta Suomessa, yksi Virossa ja yksi Intiassa. Steralla työskentelee noin 750 henkilöä, joista 70 % on Suomen tehtaissa, 12 % Viron tehtaassa ja 18 % Intian tehtaassa. Tuotantotilaa Steralla on käytössä yhteensä 55 000 m<sup>2</sup>. [1]

Steralla on käytössään suuri määrä tuotantokoneita, joihin lukeutuvat muun muassa levytyökeskukset, robotti- ja manuaalisärmäyspuristimet, taivutus-automaatti, hydrauliset puristimet ja nauhalinjat, SMD-ladontakone, aaltojuotoskone sekä reflow-uuni. Muun muassa mainittujen koneiden valvontaa varten Stera kehittää Smart Factory -tuotannonvalvontajärjestelmää, johon myös tämä opinnäytetyö liittyy. [1]

Smart Factory -tuotannonvalvontajärjestelmä sisältää ainakin neljä eri tasoa: anturit, yhdyskäytävät, pilvipalvelu ja monitorointijärjestelmä. Tämä opinnäytetyö keskittyy näistä antureihin sekä antureista yhdyskäytävään siirtymiseen.

Steralla on testissä eräs kaupallinen kiihtyvyyssanturi, joka on toiminut hyvin koneiden käyttöasteen mittauksessa. Kyseinen kaupallinen anturi ei kerro kuitenkaan liikkeen määrää tai suuntaa. Nämä suureet ovat toivottuja, sillä niistä voitaisiin saada tietoa koneen toiminnasta. Esimerkiksi koneen rikkoutuessa sen muuttunut liike saattaa aiheuttaa virheellisen työn. Liikkeen määrää ja suuntaa ilmaiseva anturi voisi näin ennaltaehkäistä huonojen tuote-erien valmistuksen.

Saadakseen täsmälleen omiin tarpeisiinsa sopivan laitteiston koneiden automaattiseen valvontaan yritys on käynnistänyt kehityshankkeen, jonka tuloksena on oma, aiempaa monipuolisemmin koneiden käyttöä mittaava, Smart Factoryksi kutsuttu järjestelmä. Tämän saavuttamiseksi suunnitellaan oma anturikortti, jonka kehitys aloitetaan tässä opinnäytetyössä käsiteltävällä protolaitella.



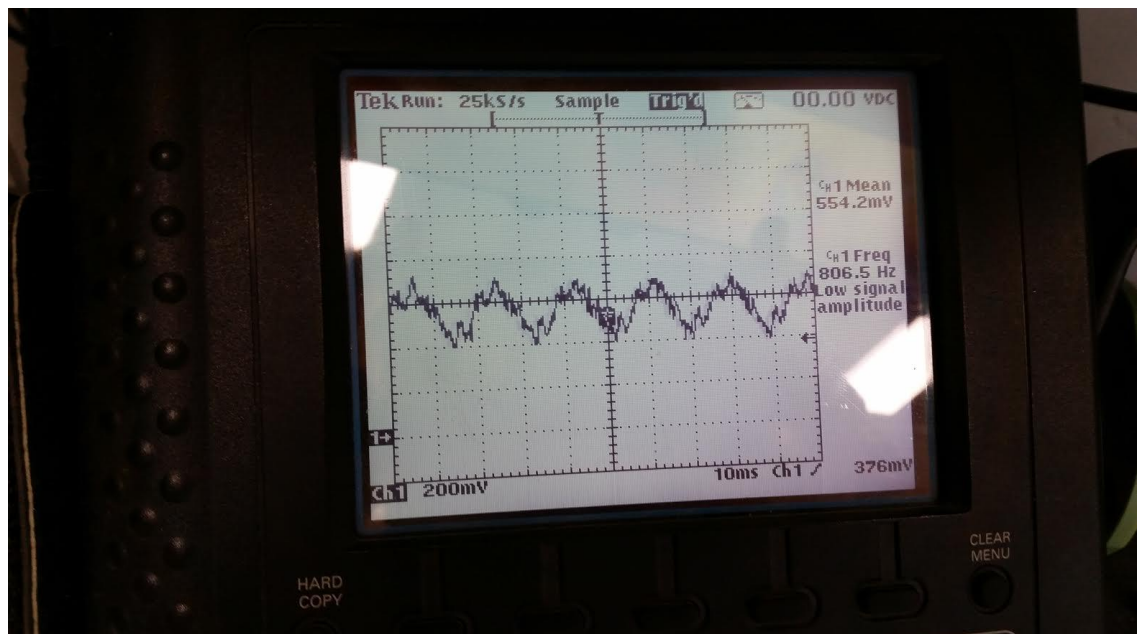
Protolaitteella pyritään testaamaan erilaisia antureita, joista tärkeimpänä kolmen akselin kiihtyvyysanturia. Laitteen tulee olla akku- tai paristokäyttöinen, sillä lopullisen tuotteen asennuskohteet saattavat olla paikoissa, joihin ei voi tuoda johtoja. Tästä syystä sen tulee olla myös mahdollisimman vähävirtainen ja pieni kooltaan. Laitteen tuottama informaatio täytyy siirtää langattomasti. Informaatio pitää niin ikään saada päätelaitteelle, esimerkiksi tietokoneelle tai internetin pilvipalveluun, jossa data käsitellään ja asetetaan luettavaan formaattiin. Koska lopullisen laitteen hinta pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, komponenttien valintaan vaikuttaa koon ja sähkönkulutuksen lisäksi myös hinta.

### 3 PROTOKORTTI

#### 3.1 Anturit

Anturikomponenttien valintaan vaikutti hinta, virrankulutus, saatavuus ja fyysinen koko. Protokortilla testataan kolmea anturia: kiihtyvyysanturia, mikrofonia ja infrapuna-anturia, joista pääpaino on kiihtyvyysanturissa. Infrapuna-anturi havaitsee valon voimakkuutta infrapuna-alueella, mikrofoni havaitsee audioalueen ääntä ja kiihtyvyysanturi ilmaisee kappaleen kiihtyvyyden.

Värähtelevä kappale on kiihtyvässä tilassa. Kuvassa 1 näkyy tinaimurin aseman päälle asetetusta analogisesta kiihtyvyysanturista (Freescale FXLN8371QR1) muodostuva värähtely tinaimurin ollessa käytössä. Kiihtyvyysanturi on asetettu  $\pm 2 \text{ g}$  asentoon, jossa jännitteenä  $0 \text{ g}$  on  $0,75 \text{ V}$  ja herkkyys  $229,0 \text{ mV/g}$ . Tarkastelussa on z-akseli, joka näyttää kuvassa myös anturin asennosta riippuvan maan vetovoiman. Mittauksessa anturi on selällään maata kohti, jolloin sen vetovoima muodostaa z-akseliin  $-1 \text{ g}$  kiihtyvyyden eli noin  $550 \text{ mV}$ ; tietolehdessä  $-1 \text{ g}$  on määritetty jännitteeksi  $521 \text{ mV}$ . [3]

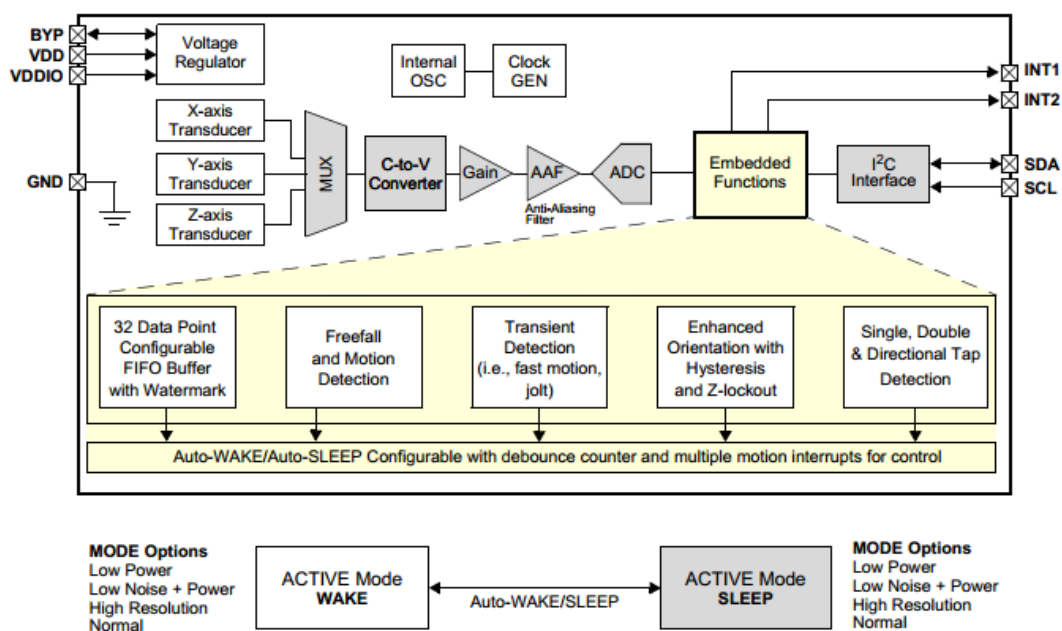


Kuva 1. Oskilloskooppikuva tinaimuriaseman värähtelystä.

Staattisen värähtelyn lisäksi kiihtyvyysanturi havaitsee myös pulssimaiset liikkeet riippuen näytteenottotaajuudesta, pulssin voimakkuudesta ja värähtelevän kappaleen materiaalista. Korkeampi näytteenottotaajuus mahdollistaa nopeampien pulssien huomaamisen. Nopeiden pulssien havaitsemista vaikeuttaa värähtelevän kappaleen asettumisnopeus.

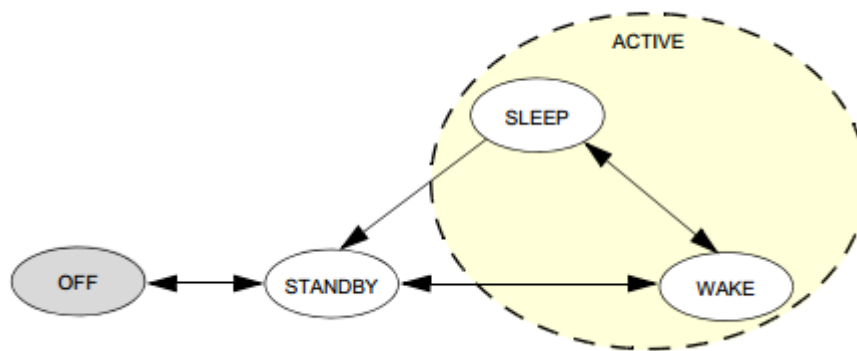
### 3.1.1 Digitaalinen kiihtyvyysanturi (MMA8652FC)

MMA8652FC on Freescale Semiconductorin digitaalinen MEMS- eli mikroeletromekaaninen kiihtyvyysanturi, joka on pienessä 2 mm × 2 mm kaksisivuisessa johdottomassa DFN-paketissa. Se sisältää 32 näytteen FIFO-muistin kolmelta akselilta. FIFO, eli First in First Out, on muistinkäsittelymenetelmä, jossa lukujärjestys on sama kuin kirjoitusjärjestys. Anturin säätömahdollisuuksia ovat mm. näytetaajuus (ODR), joka säätyy 1,56 Hz – 800 Hz kahdeksassa pykälässä,  $\pm 2$ ,  $\pm 4$  tai  $\pm 8$  g:n herkkyys, 8 tai 12 bitin resoluutio sekä useita eri toimintaan vaikuttavia konfiguraatioita transientista orientaatioon. Kommunikaatorajapintana kontrollerin kanssa toimii I<sup>2</sup>C-väylä ja kaksi määriteltävää keskeytystä. [3]



Kuva 2. MMA8652FC:n lohkokaavio [3].

Kuvassa 2 on havaittavissa kolme, kolmelle eri akselille asetettua kapasitiivista muunninta, joita anturin valitsin käy läpi ja antaa vuorotellen yhden näistä kapasitanssijännitemuuntimelle. Jännite vahvistetaan, suodatetaan ja muunnetaan digitaalseksi rekisteriin tallentamista varten. Sieltä se on luettavissa I<sup>2</sup>C-väylän kautta. Kun anturilla on uusi datapistepaketti valmiina, se voidaan ilmaista keskeytyslinjojen avulla. FIFO-muistin avulla anturi voi kerätä enimmillään 32 datapistepakettia kiihtyvyydataa. Keskeytys voidaan asettaa mihin tahansa yhteen kohtaan muistia, mikä mahdollistaa datan lukemisen purskeissa. Tämä vähentää I<sup>2</sup>C-väylän käyttöä ja johtaa pienempään virrankulutukseen. Muita keskeytysmahdollisuuksia ovat transientti, orientaatio, pulssintunnistus, vapaa pudotus tai liike ja heräämistilanne. [3]



Kuva 3. MMA8652FC:n toimintamoodi [3].

IC:llä on kolme eri toimintamoodia: aktiivinen, valmiustila ja sammutettu, joiden siirtymissuunta näkyy kuvassa 3. Aktiivitiloja on kaksi: uni- ja valvetila. Käyttöjännitteen noustessa yli 1,8 V:n laite siirtyy sammutettu-tilasta valmiustilaan. Valmiustilassa sisäiset kellot eivät ole käytössä ja ainoastaan laitteen digitaaliset osat ovat aktiivisia. Tässä tilassa se pystyy vastaanottamaan komentoja I<sup>2</sup>C-väylän kautta. Valmiustilassa kaikki laitteen toimintaan vaikuttavat säätörekisterit ovat säädettäviä, kun taas aktiivitilassa esimerkiksi kaikki kontrollirekisterit ovat vain lukua varten yhtä poikkeusta lukuunottamatta. Valmiustilasta siirrytään aktiivitilaan asettamalla ensimmäisen kontrollirekisterin vähiten merkitsevä bitti loogiseksi ykköseksi, mikä on edellä mainittu poikkeus toiseen suuntaan mentäessä. Aktiivitilassa IC:n kaikki osat ovat toiminnassa. [3]

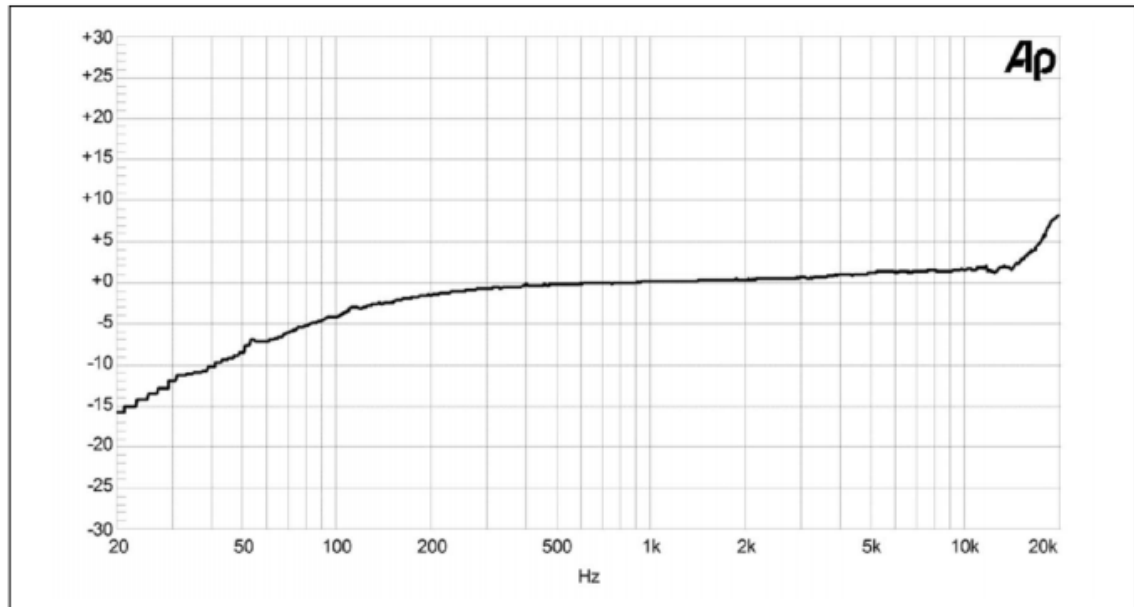
Anturin virrankulutukseen vaikuttaa näytetaajuus ja ylinäytteistys, joita on uni- ja valvetilalle neljä eri konfiguraatiota: normaali, vähätehoinen ja -häiriöinen, korkearesoluutioinen sekä vähätehoinen. Taulukossa 1 näkyy näytetaajuuden ja ylinäytteistyksen vaikutus virrankulutukseen. 800 Hz:n näytetaajuudella näytteenottotaajuus on kaikissa konfiguraatioissa aina kaksinkertainen ja virrankulutus täten kaikissa sama. Unitilojen suurin ODR on 50 Hz, kun taas valvetila voi käyttää kaikkia näytetaajuuksia. [3]

Taulukko 1. MMA8652FC:n näytetaajuuden (ODR) ja ylinäytteistyskonfiguraation vaikutus virrankulutukseen [3].

ODR (Hz)	Mode							
	Normal (00)		Low Noise Low Power (01)		High Resolution (10)		Low Power (11)	
	Current $\mu$ A	OS Ratio	Current $\mu$ A	OS Ratio	Current $\mu$ A	OS Ratio	Current $\mu$ A	OS Ratio
1.56	27	128	9	32	184	1024	6.5	16
6.25	27	32	9	8	184	256	6.5	4
12.5	27	16	9	4	184	128	6.5	2
50	27	4	27	4	184	32	15	2
100	49	4	49	4	184	16	26	2
200	94	4	94	4	184	8	49	2
400	184	4	184	4	184	4	94	2
800	184	2	184	2	184	2	184	2

### 3.1.2 Audiosensori (MP23AB02B)

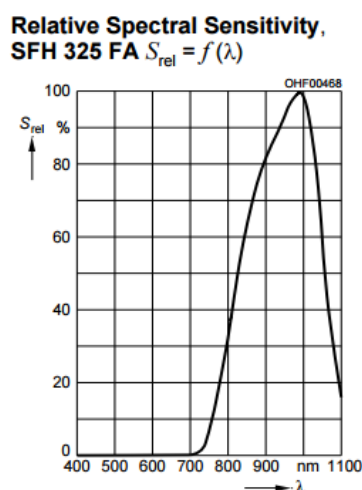
MP23AB02B on STMicroelectronicsin pienessä RHLGA-kotelossa oleva MEMS-audiosensori. Sen taajuusvaste on lähes suora 200 Hz:stä 13 kHz:iin, herkkyys tyypillisesti  $-38$  dBV/Pa 1 kHz:n taajuudella ja akustinen ylikuormituspiste 125 dB SPL. Tarkempi audioalueen taajuusvaste näkyy kuviossa 1. Sensorin ulostulosta saadaan suoraan jännite, jota voidaan mitata AD-muuntimen avulla. Tietolehden mukaan sensorin kanssa suositellaan käytettävän operaatiovahvistinta, mikä vähentää sensorin kuormitusta. [4]



Kuvio 1. MP23AB02B:n taajuusvaste [4].

### 3.1.3 Infrapuna-anturi (SFH325FA)

SFH325FA on Osramin NPN-fototransistori. Se soveltuu 750–1 120 nm valon aallonpituuksille eli infrapuna-alueelle. Kuviosta 2 nähdään herkkyyden kasvun alku noin 750 nm kohdalla ja huipun saavuttaminen noin 1000 nm kohdalla. Transistorin lävitse kulkeva virta on verrannollinen sensoriin osuvan valon määrään. Virta voidaan muuttaa jännitteeksi AD-muuntimelle luettavaksi. [5]



Kuvio 2. SFH324FA-fototransistorin suhteellinen herkkyys valon aallonpituuden funktiona [5].

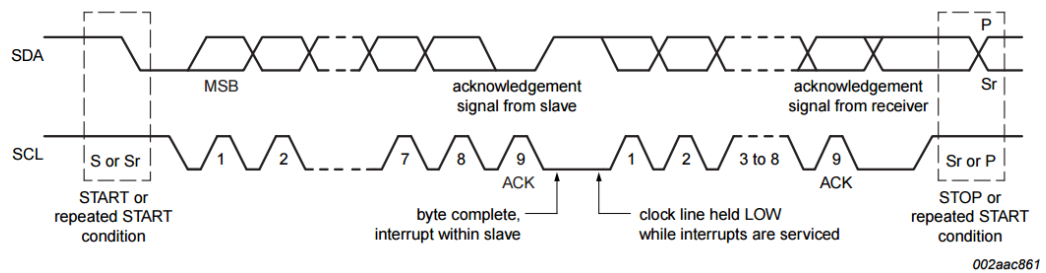
### 3.2 Kommunikaatorajapinnat

Protossa kommunikaatio eri osien välillä toteutetaan I<sup>2</sup>C-väylällä, radiolinkillä, joka pohjautuu IEEE 802.15.4 -standardiin, ja UARTilla, joka muunnetaan USB-yhteensopivaksi. I<sup>2</sup>C:tä käytetään proton sisäisessä kommunikaatiossa kontrollerin ja kiihtyvyysanturin välissä, radiolinkkiä protojen välisissä kommunikaatioissa ja UARTia proton ja tietokoneen välisissä kommunikaatioissa. UART muunnetaan USB:ksi, sillä sarjaportteja löytyy nykypäivänä harvoista tietokoneista, kun taas USB-liitäntä on lähes jokaisessa.

I<sup>2</sup>C, radiolähetin, -vastaanotin ja UART löytyvät esimerkiksi Atmelin ATmega256RFR2-mikroprosessorista [6], jota tässä työssä tullaan testaamaan. UART muunnetaan USB:ksi FTDI:n FT230x-piirillä. FT230x-piiri tunnistuu tietokoneella virtuaalisena sarjaporttina FTDI:n ajurien avulla. [7]

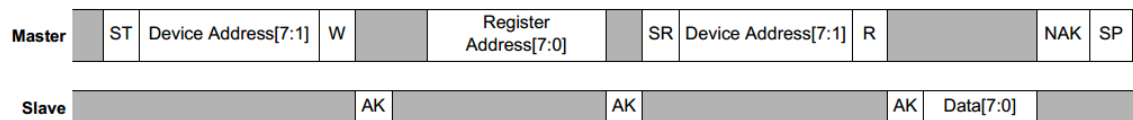
#### 3.2.1 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>C eli Inter-Integrated Circuit on Philips Semiconductorsin (nyk. NXP Semiconductors) kehittämä tiedonsiirtoväylä, joka käyttää kahta kaksisuuntaista linjaa: kello- ja datalinjaa. Yhdelle väylälle voidaan asettaa monta isäntää ja orjaa, ja yksittäiset laitteet voivat olla molempia. Jokaisella orjalla on tyypillisesti 7-bittinen osoite, joka määrittää orjien teoreettiseksi enimmäismääräksi yhdelle väylälle 128. Määrää rajoittaa myös linjojen pituudesta ja etäisyyksistä muodostuva väylän kapasitanssi, jonka enimmäissuuruus riippuu siirtonopeudesta ja ylösvetovastusten suuruudesta. Tyypillinen siirtonopeus I<sup>2</sup>C-väylässä on 100 kb/s, mutta kaikki fysikaalisesti käytännölliset nopeudet ovat teoriassa mahdollisia. Muita käytettyjä nopeuksia ovat 10 kb/s, 400 kb/s, 1 Mb/s, 3,4 Mb/s ja 5 Mb/s. [8]



Kuva 4. I<sup>2</sup>C-väylän ajoitusdiagrammi [6].

Tyypillisessä tiedonsiirrossa I<sup>2</sup>C-väylässä tiedonsiirron aloittaja on aina isäntä ja tavujen pituus on kahdeksan bittiä. Jokaista tavua seuraa yksi kuittausbitti. Aloitus tapahtuu, kun isäntä vetää datalinjan (kuvassa 4 SDA) alas ja tämän jälkeen aloittaa kellon tuottamisen kellolinjaan (kuvassa 4 SCL). Isäntä kirjoittaa datalinjaan orjan 7-bittisen osoitteen alkaen eniten merkitsevistä bitistä, ja kahdeksas bitti kertoo orjalle tulevan datansiirron suunnan. Orja kuittaa viestin saapuneeksi vetämällä yhdeksän kellopulssin kohdalla datalinjan alas ja alkaa vastaanottamaan tai lähettämään dataa kuvan 4 mukaisesti. [8]



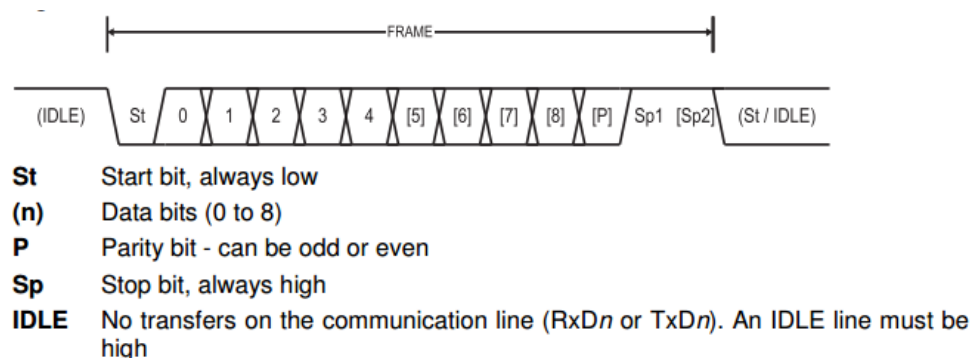
Kuva 5. MMA8652FC-piirin yhden rekisterin lukusekvenssi, jossa ST tarkoittaa aloituskonditiota, W kirjoitusbittiä, R lukubittiä, AK kuittausta, NAK kuittauksen puuttumista, SR uudelleenaloituskonditiota ja SP lopetuskonditiota [3].

Usein aloituksen jälkeen seuraa halutun rekisterin osoittaminen. Rekisteriin kirjoittaminen aloitetaan heti rekisteriosoituksen kuittauksen jälkeen, mutta luku vaatii tällöin uudelleenaloituskondition. MMA8652FC sisältää autoinkrementaation, joka mahdollistaa rekistereihin kirjoittamisen ja niistä lukemisen sarjassa ilman sekvenssin uudelleenaloittamista. Jokaisen rekisteristä luetun tai sinne kirjoitetun tavun jälkeen rekisteriosoite kasvaa automaattisesti yhdellä osoittaen aina seuraavaan rekisteriin. Lukusekvenssissä isäntä kuittaa orjan kirjoittamat tavut, jos isäntä vaatii seuraavan rekisterin kirjoittamista. [3]



### 3.2.2 UART

UART on asynkroninen sarjalähetin ja -vastaanotin. Datan vastaanottoon ja lähetykseen tarvitaan kumpaankin vain yksi linja ja yhdessä linjassa on kiinni tyypillisesti vain yksi lähettäjä ja vastaanottaja. Datan siirtonopeus on ennalta sovittu lähettäjän ja vastaanottajan kesken, sillä erillistä kellopulssia ei UARTissa lähetetä. Ennalta määritetään myös data- ja lopetusbittien määrä sekä parillisuustarkistusbitti. [6]



Kuva 6. UARTin kehysformaatti [6].

Kun kommunikaatiota ei tapahdu, linja on ylhäällä. Aloitus tapahtuu, kun linja vedetään alas. Aloitusbitti on siis aina looginen nolla, mikä ilmenee myös kuvasta 6. Aloitusta seuraa ennalta määritetty määrä databittejä, joita tyypillisesti on viidestä yhdeksään bittiin. Databittien määrä valitaan tarvittavan suurimman numeron mukaan, jota bittijono osoittaa. Esimerkiksi ASCII-taulukon perusmerkit on mahdollista kirjoittaa seitsemällä bitillä. Databittejä seuraa parillisuustarkastusbitti, joka määrittää databittien parillisuuden. Tätä käytetään virheentarkasteluun, eikä se ole välttämätön sarjaliikenteen toimintaan. Parillisuusbitti kertoo vastaanottajalle lähettäjän datapurskeessa olleiden loogisten ykkösten määrän joko parillisena tai parittomana. Vastaanottaja vertaa saapuneen datan parillisuutta parillisuusbittiin. Parillisuusbittiä seuraa aina vähintään yksi lopetusbitti. [6]

UARTin siirtonopeuden valintaan vaikuttaa UARTia käyttävän laitteen kellotaajuus. Virheiden määrä on pienimmillään, kun siirtonopeus on laitteen

kelloon nähden jaollinen. Tavallisesti käytetyt siirtonopeudet alkavat 2 400 b/s ja 14,4 kb/s ja jatkuvat niistä kahden kertoimilla. Siirtonopeuden voi kuitenkin määrittää omavaltaisesti riippumatta yleisesti käytetyistä nopeuksista. [6]

Taulukko 2. Siirtonopeuden vaikutus virheprosenttiin eri kellotaajuuksilla [6].

Baud Rate (bps)	fosc = 4.0000 MHz				fosc = 7.3728 MHz				fosc = 8.0000 MHz			
	U2Xn = 0		U2Xn = 1		U2Xn = 0		U2Xn = 1		U2Xn = 0		U2Xn = 1	
	UBRR	Error	UBRR	Error	UBRR	Error	UBRR	Error	UBRR	Error	UBRR	Error
2400	103	0.2%	207	0.2%	191	0.0%	383	0.0%	207	0.2%	416	-0.1%
4800	51	0.2%	103	0.2%	95	0.0%	191	0.0%	103	0.2%	207	0.2%
9600	25	0.2%	51	0.2%	47	0.0%	95	0.0%	51	0.2%	103	0.2%
14.4k	16	2.1%	34	-0.8%	31	0.0%	63	0.0%	34	-0.8%	68	0.6%
19.2k	12	0.2%	25	0.2%	23	0.0%	47	0.0%	25	0.2%	51	0.2%
28.8k	8	-3.5%	16	2.1%	15	0.0%	31	0.0%	16	2.1%	34	-0.8%
38.4k	6	-7.0%	12	0.2%	11	0.0%	23	0.0%	12	0.2%	25	0.2%
57.6k	3	8.5%	8	-3.5%	7	0.0%	15	0.0%	8	-3.5%	16	2.1%
76.8k	2	8.5%	6	-7.0%	5	0.0%	11	0.0%	6	-7.0%	12	0.2%
115.2k	1	8.5%	3	8.5%	3	0.0%	7	0.0%	3	8.5%	8	-3.5%
230.4k	0	8.5%	1	8.5%	1	0.0%	3	0.0%	1	8.5%	3	8.5%
250k	0	0.0%	1	0.0%	1	-7.8%	3	-7.8%	1	0.0%	3	0.0%
0.5M	-	-	0	0.0%	0	-7.8%	1	-7.8%	0	0.0%	1	0.0%
1M	-	-	-	-	-	-	0	-7.8%	-	-	0	0.0%
Max. <sup>(1)</sup>	250 kbps		0.5 Mbps		460.8 kbps		921.6 kbps		0.5 Mbps		1 Mbps	

Notes: 1. UBRR = 0, Error = 0.0%

ATmega256RFR2-mikrokontrollerissa UARTin siirtonopeus määritetään UBRR-arvon sekä nopeuden tuplausbitillä U2X. Siirtonopeus lasketaan ATmegassa kaavalla:

$$bps = \frac{fosc}{\frac{16}{U2X + 1} * (UBRR + 1)}$$

Jos UBRR on 0 ja tuplanopeus on päällä, seuraa maksiminopeus, joka on ATmegassa aina kahdeksalla jaettu kellotaajuus. Tämä näkyy myös taulukossa 2, jossa on listattu muutama mikrokontrollereissa käytetty kellotaajuuden ja UARTin siirtonopeuden kombinaation virheprosentti sekä kombinaation UBRR-arvo. [6]

UARTissa käytetään tarpeen mukaan erillisiä siirronsallimislinjoja, joilla pyritään estämään lähettäjää lähettämästä uutta dataa, kun vastaanottajan datapuskuri ei kykene ottamaan sitä vastaan. Tälle on tarvetta esimerkiksi, kun vastaanottajan

muisti on pieni ja siirtonopeus suuri tai kun vastaanottaja on suorittamassa ajoitusherkkiä komentosarjoja.

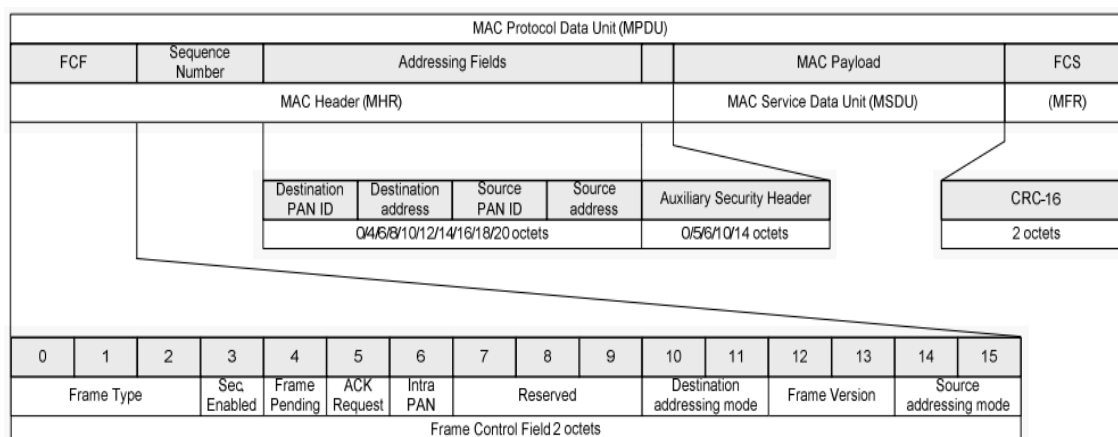
### 3.2.3 IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 on tiedonsiirron standardi, joka määrittää fyysisen ja MAC-tason matalan siirtonopeuden langattomalle likiverkolle. IEEE 802.15.4 on kehitetty pääasiassa pienivirtaisille, yksinkertaisille ja kustannuksiltaan halvoille laitteille. Standardille on käytössä kolme eri taajuuskaistaa: 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz. ATmega256RFR2 käyttää 2,4 GHz:n kaistaa. Sen lähetysteho on -17 dBm:sta 3,5 dBm:iin ja vastaanoton herkkyys -100 dBm. Maksimilähetysteholla ATmega256RFR2 mikrokontrollerin radiolähetin-vastaanottimen virrankulutus lähetyksessä on 14,5 mA. Lähetin käyttää OQPSK-modulaatiota datan moduloimiseen, ja käytössä olevia siirtonopeuksia ovat 250 kb/s, joka noudattaa IEEE 802.15.4 standardia, sekä 500 kb/s, 1 Mb/s ja 2 Mb/s. [6]

PHY Protocol Data Unit (PPDU)			
Preamble Sequence	SFD	Frame Length	PHY Payload
5 octets Synchronization Header (SHR)		1 octet (PHR)	max. 127 octets PHY Service Data Unit (PSDU)
MAC Protocol Data Unit (MPDU)			

Kuva 7. IEEE 802.15.4 runkoformaatti [6].

IEEE 802.15.4 -standardin mukaiset paketit lähetetään kuvan 7 osoittamassa formaatissa. Ensimmäiset viisi oktetia toimivat synkronointitunnisteena, josta vastaanottaja tunnistaa paketin aloituksen. Synkronointitunnisteen jälkeen ilmaistaan paketin oktetien määrä, jonka maksimiarvo voi IEEE 802.15.4 -standardissa olla 127. [6]



Kuva 8. IEEE 802.15.4 MAC-tason rakenne [6].

MAC-tasolla lähetettävän paketin tietosisällön alkuun asetetaan MAC-ylätunniste, joka sisältää on paketin informaation. MAC-tason rakenne näkyy kuvassa 8. Kaksioktettinen FCF eli Frame Control Field on säätöosa, joka kertoo paketin ominaisuudet. Tätä seuraa järjestysnumero, jota käytetään kopioitujen lähetysten tarkastamiseen. Vastaanottajan kuittaus sisältää lähetetyn paketin järjestysnumeron, mikä puolestaan kertoo lähettäjälle, että kyseinen paketti on vastaanotettu. Järjestysnumeroa seuraavat osoitetiedot ja turvallisuuslisätunniste. Osoitetietojen pituus on 0–20 oktetia. Osoitetiedoissa PAN-tunnisteet ovat maksimissaan kaksioktettisia ja osoitteet maksimissaan kahdeksanoktettisia. Turvallisuusprosessointia varten käytettävän lisätunnisteen pituus on 0–14 oktetia. Näiden jälkeen alkaa varsinainen data, jonka maksimipituus määrittyy, kun paketin kokonaispituudesta 127 vähennetään MAC-tunniste ja kahden oktetin mittainen tarkastussekvenssi FCS. [6]

ATmega256RFR2:ssa mikrokontrollerin ja radiolähetin-vastaanottimen välinen keskustelu tapahtuu asynkronisesti. Kaikki radion rekisterit ovat kartoitettu kontrollerin I/O-tilaan, jolloin radion rekistereiden säätäminen on yksinkertaista. Lähetin tuottaa automaattisesti synkronointitunnisteen, ja lähetys tapahtuu automaattisesti tilakontrollirekisteristä muuttamalla radion tila lähetystilaan. Jokainen lähetettävä oktetti sijaitsee omassa rekisterissään. Lähetys ja vastaanotto jakavat rekisterin, mikä voi aiheuttaa datan häviämistä, jos lähetystä ja vastaanottoa kirjoitetaan samaan aikaan rekistereihin. [6]

### 3.3 Teholähde

Teholähteenä käytetään Li-Po-akkua, sillä sen energiatiheys on akuksi verrattain suuri fyysiseen kokoonsa nähden. Proton yhteydessä halutaan testata myös ladattavaa tehölähdettä. Taulukossa 3 on listattu karkeasti erilaisten pienten paristojen ja akkujen kapasiteettia tilavuuteen nähden. Taulukossa ei ole huomioitu todelliseen kapasiteettiin vaikuttavia ilmiöitä. [9]

Taulukko 3. teholähteen kapasiteetti tilavuuden suhteen [9].

Akku/paristo	Tilavuus	Kapasiteetti	Nom. jännite	Paino	$\frac{U \times I \times T}{V}$
Kokam SLPB353452 Li-Po-akku	6,1 cm <sup>3</sup>	560 mAh	3,7 V	12 g	0,35 $\frac{\text{Wh}}{\text{cm}^3}$
Energizer NH15-2300 NiMH -akku	33 cm <sup>3</sup>	2300 mAh	1.2 V	30 g	0,084 $\frac{\text{Wh}}{\text{cm}^3}$
Energizer CR2032 Li/MnO <sub>2</sub> -paristo	1,0 cm <sup>3</sup>	240 mAh	3.0 V	1 g	0,72 $\frac{\text{Wh}}{\text{cm}^3}$
Energizer EN91 Zn/MnO <sub>2</sub> -paristo	33 cm <sup>3</sup>	3000 mAh	1.5 V	14.5 g	0,14 $\frac{\text{Wh}}{\text{cm}^3}$

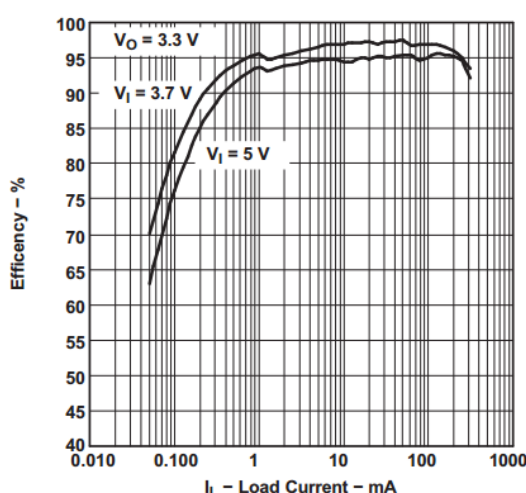
Taulukon vertailu osoittaa, että Li-Po-akun energiatiheys on hyvä, mutta CR2032-nappipariston energiatiheys on selvästi suurin verratuista tehölähteistä. Tämä tekee siitä hyvän vaihtoehdon korvaavaksi tehölähteeksi, jos akkuratkaisu ei sovi lopulliseen tuotteeseen.

### 3.4 KytKentäkaavio

Viiden sivun mittainen liite 1 sisältää koko protokortin kytKentäkaavion. Sivut ovat nimetty kunkin sivun osien tai toimintojen perusteella. KytKennän suunnitteluun käytetty ohjelma on Mentor Graphicsin PADS-logic.

Li-Po-akun latauspiirin BQ24012 (*IC9*) käyttöjännite saadaan USB-liittimen *J5* tai ulkoisen teholähteen kautta. Ulkoinen teholähde voidaan kytkeä liittimeen *J4*, joka löytyy sivulta 4 (IO/ANA). Suojaukseksi jännitelähteet erotetaan toisistaan diodien *D6* ja *D10* avulla. Diodit toimivat myös negatiivisen polariteetin kytkennän suojana. Toimiakseen normaalisti BQ24012:n käyttöjännite tulee olla 3–16,5 V, jolloin USB-liittimen ja latauspiirin välisen diodin kynnyksjännite voi olla enimmillään 2 V, kun USB:n käyttöjännite oletetaan olevan 5 V. Latauspiiri hallitsee Li-Po-akun lataukseen liittyvät parametrit ja ilmoittaa *STAT1*-, *STAT2*- ja *PG*-pinneihin kytkettyjen ledien avulla akun tilan. Latausvirta määritetään latauspiirin *ISSET*-pinniin kytkettävällä vastuksella, jonka laskukaava löytyy piirin tietolehdestä. 4,7 k $\Omega$  vastuksella latausvirta on maksimissaan 178 mA, mikä on määritetty reilusti alle USB 2.0:n 500 mA virtarajan [11]. [10]

Li-Po-akun jännite reguloidaan TPS62205-hakkurilla (*IC4*), joka tuottaa 2,5 V käyttöjännitteen laitteelle. Hakkuri pystyy tuottamaan maksimissaan 300 mA lähtövirran, jonka tulisi riittää laitteen pienivirtaisille komponenteille. Hakkurilla on korkea hyötysuhde pienillä virroilla, mikä näkyy kuviosta 3, jossa on 3,3 V:n versio samasta hakkurista eli TPS62203. Hakkurin eri versioiden toimintaperiaatteet ovat samat, mutta sisäisen takaisinkytkennän jännitteenjaon vastussuhde muuttuu, mikä tuottaa eri ulostulojännitteet. Hakkuri vaatii ulkoisina komponentteina vain suotokondensaattorit ja hakkurikelan. [12]



Kuvio 3. TPS62203-hyötysuhde kuormavirran funktiona [12].

ATmega256RFR2-mikrokontrolleri kytketään 2,5 V:n käyttöjännitteeseen, ja jokaiseen käyttöjännitenastaan (*DEVDD*) kytketään suotokondensaattori virtapiikkejä varten. Prosessori ohjelmoidaan SPI- (*J1*) tai JTAG-liitynnän (*J2*) kautta. Ohjelman virheenetsintään on käytössä yksi LED (*D1*) ja painike (*S2*). Prosessorin resetoimiselle on myös painike (*S1*). ATmega256RFR2 vaatii vähintään yhden kiteen (*Y1*) radiomoduulille, jonka resonanssitaajuus tulee olla 16 MHz. Toista prosessoriin kytkettyä kidettä (*Y2*), jonka resonanssitaajuus on 32 768 Hz, käytetään reaaliaikakellolle. ATmega256RFR2 voi käyttää *Y1*-kidettä tai piirin sisäistä, 1:2 skaalattua 16 MHz RC-oskillaattoria systeemin kellona. [6]

ATmegan radion lähetys- ja vastaanottopinnit on kytketty baluunisuoitimelle, joka muuntaa balansoidun signaalin balansoimattomaksi. Pintaliitosantennin (*ANT1*) ja U.FL-liittimeen (*ANT2*) kytkettävän antennin käytön valinta tapahtuu analogikytkimellä AS213-92LF (*IC5*). ATmegan antenninvalintasysteemillä vahvemman signaalin vastaanottava antenni voidaan valita automaattisesti. Tähän käytetään pinnejä *DIG1* ja *DIG2*. [6]

Differentiaalidatalinjat *USB\_D-* ja *USB\_D+* päätetään FT230x-piirin tietolehdessä suositelluilla passiivikomponenteilla. Käyttöjännitteinä piiri käyttää USB:n 5 V:n sekä hakkurin tuottamaa 2,5 V:n jännitettä. FT230x kykenee tuottamaan 3,3 V käyttöjännitteen, joka on laitteessa tarpeeton. UART-data siirtyy *RXD-* ja *TXD-* linjoissa. FT230x lähetyspinni (*TX*) tulisi vetää ATmegan vastaanottopinniin (*RX*) ja päinvastoin, mikä tarkoittaa, että kytkentäkuvassa ne on väärin kytketty. [7]

Liittimen *J4* kautta ATmegaan voi kytkeä kaksi I/O-linjaa ja kaksi analogialinjaa. Analogialinjojen jännitteenjaon avulla on mahdollista mitata analogiamuuntimen referenssijännitettä suurempia jännitteitä, kuitenkin tarkkuuden kustannuksella. Linjoihin voi kytkeä esimerkiksi erilaisia ohjauksia tai antureita tarpeen mukaan.

Audiosensorin (*MIC*) signaali vahvistetaan operaatiovahvistimella *IC3*. Sen kytkennässä on signaalin suodatuksen mahdollisuus. Koska protossa testataan vain äänenvoimakkuutta, tarvitaan ainoastaan yksipuolinen audiosignaali. Suurimman mahdollisen äänenvoimakkuuden svingin voi tuottaa vahvistamalla vain toista puolta audiosignaalista koko käyttöjännitteelle. Tasasuuntaussilta,

joka mahdollistaisi molempien puolien vahvistamisen, voisi parantaa mittaustarkkuutta, mutta vain toista puolta käyttämälläkin saadaan riittävä tarkkuus. Audiosensorin ja fototransistorin signaalitasot luetaan ATmegan analogiamuuntimella. Jos toisenlaisessa kotelossa olevaa eri transistoria halutaan testata, kytkentään on tätä varten lisätty kaksi fototransistoria. Tarkoitus ei ole kytkeä näitä samanaikaisesti. MMA8652 kytketään I<sup>2</sup>C-linjaan, ja käyttöjännitteiden sekä sisäisen regulaattorin (*BYP*) nastoihin kytketään suotokondensaattorit. Keskeytyslinjat kytketään suoraan prosessorin keskeytysnastoihin. [3]

### 3.5 Layout

Liitteen 2 piirilevyn asettelukuvat on piirretty Mentor Graphicsin PADS-layout- ja PADS-router-piirilevysuunnitteluohjelmilla. Levyn koko ja kiinnitysreikien kohdat on määritetty Supertronicsin PP42N-koteloon sopivaksi. [15] Minimijohdinleveys määritetään johdinten maksimivirrasta. Kytkennän suurin mahdollinen virta on hakkurin tuottama 300 mA. Internetistä löytyvästä laskurista 35 µm:n johdinpaksuudella minimijohdinleveydeksi saadaan 300 mA:lla noin 57 µm. [13] Esimerkiksi Itead Studio -piirilevyvalmistajan tuotekehityslevyjen minimijohdinleveyden onnistuminen luvataan 0,15 mm leveydellä, joka on reilusti suurempi kuin tarvittava. [14] Siitä syystä kaikissa kytkennöissä voi käyttää samaa johdinleveyttä, poikkeuksena radiotaajuuksia kuljettavat vedot. Johdinten eristevälien määrityksessä käytetään apuna saman valmistajan suosituksia minimeistä.

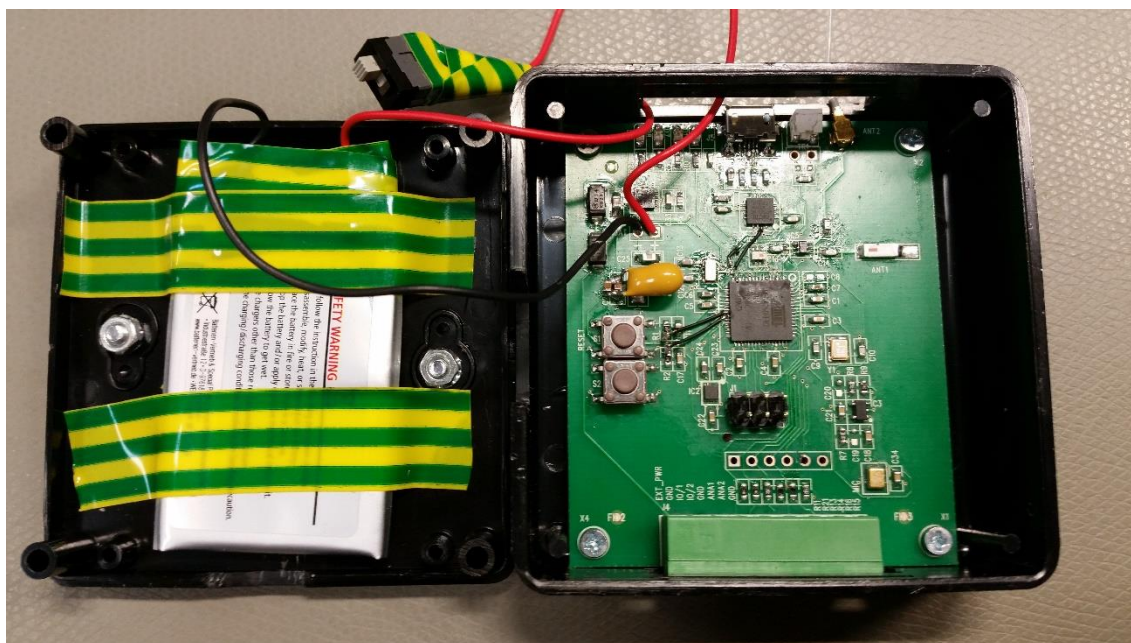
PP42N-kotelon salliman piirilevyn koon vuoksi levyllä on paljon tilaa komponenteille, mutta komponenttien sijoittelussa on pyritty kuitenkin kompakteihin ratkaisuihin. Johdinvedot on pyritty pitämään mahdollisimman lyhyinä komponenttien välissä. Lisäksi piirien käyttöjännitteen suotokondensaattorit on sijoitettu piirien käyttöjännitenastojen välittömään läheisyyteen. Kaikki komponentit ovat sijoitettu levyn yhdelle puolelle, jotta



läpiladottavat komponentit voidaan juottaa aaltojuotoskoneessa pintaliitoskomponenttien putoamatta.

## 4 PROTOTYYPIN KOKOAMINEN

Protolevyn No-Leads-piirikotelot juotettiin pastan avulla reflow-uunissa, ja muut komponentit juotettiin käsin. Levy kotelossaan näkyy kuvassa 9, josta voi huomata myös korjattuja osioita. UARTin RX ja TX johdotettiin ristiin. I<sup>2</sup>C-linjaan asetettiin ulkoiset ylösvetovastukset, sillä ATmegan sisäiset ylösvetovastukset eivät riittäneet. Hakkurin ulostuloon myös lisättiin kondensaattoreita energiavaratoksi, sillä tilatun hakkurikelan saturaatiovirta oli liian pieni. Samasta kelamallista löytyy myös korkean saturaatiovirran omaava versio.

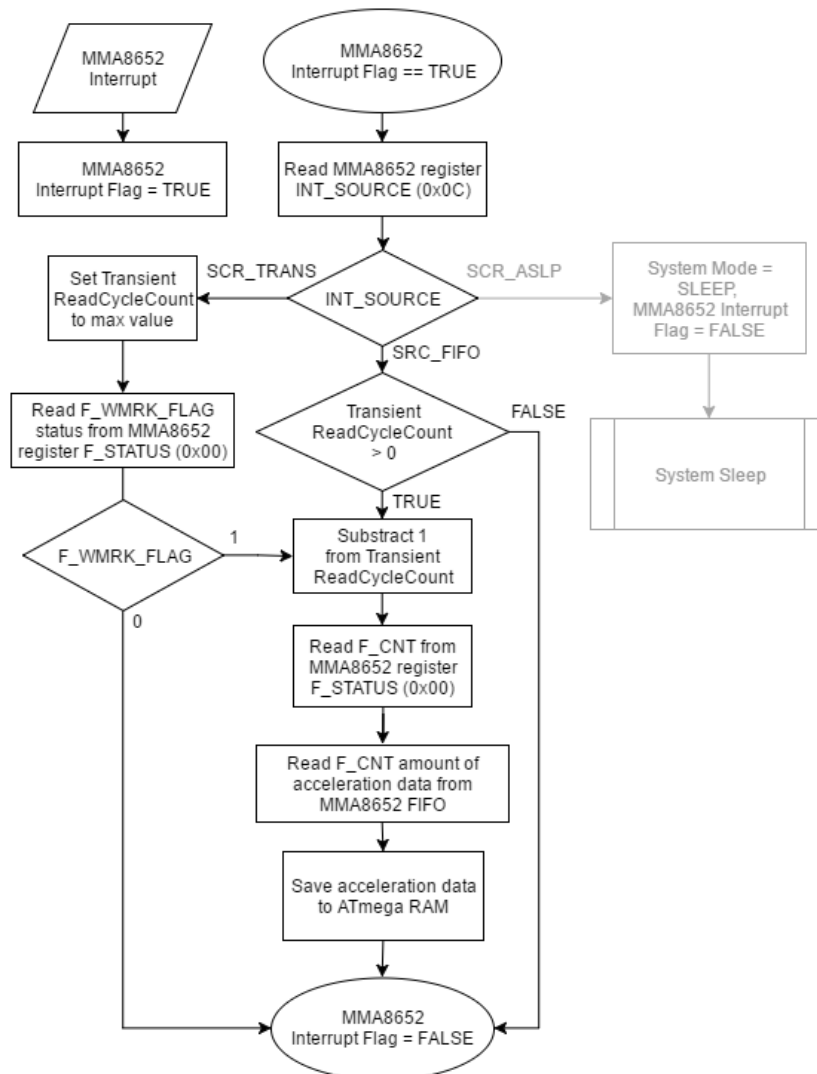


Kuva 9. Proto koottuna.

Li-Po-akku on kytketty kaksipuolisella teipillä kotelon kanteen kiinni ja varmistettu eristysteipillä. Akusta lähtevät johdot ovat kytketty protolevyyn kytkimen avulla irrotettavaksi. Kotelon kylkeä on kaiverrettu, jotta nappeja voi painaa kotelon ollessa kiinni.

## 5 OHJELMA

ATmega256RFR2-mikroprosessorin ohjelmointiin käytettiin Atmel Studio -ohjelmistoa ja AVRISP-ohjelmointilaitetta. Ohjelmaa kirjoitettiin C-kielellä, jonka kääntäjä prosessorille löytyy ohjelmistosta. Ohjelmakehityksessä keskityttiin kommunikointiin kiihtyvyyssanturin kanssa ja anturin säätöön. IEEE 802.15.4 -standardin radiolinkkiin löytyy valmiita ohjelmistopinoja, esimerkiksi BitCloud, ATmega256RFR2-mikroprosessorille, mutta testeissä käytettiin yksinkertaistettua omaa ohjelmaa, joka kuitenkin pohjautui standardiin.



Kuvio 4. MMA8652FC-kiihtyvyyssanturin kiihtyvyyssdatan lukemisen prosessi-kaavio.

Kiihtyvyysanturin FIFO-muistin lukemisessa käytettiin kuvion 4 mukaista prosessia. Prosessi alkaa, kun anturi antaa keskeytyksen. Prosessori lukee anturin keskeytysstatusrekisterin, jossa lukee keskeytyksenannon syy. Jos keskeytys on transient-tyyppinen, perättäisiä lukukertoja määrittävän muuttujan *ReadCycleCount* arvo määritetään haluttuun maksimiin, joka on säädettävissä. Jos keskeytys oli FIFO-tyyppinen, tarkastetaan *ReadCycleCount* arvo. Jos se on enemmän kuin 0, siirrytään lukuprosessiin. Transient-keskeytyksen yhteydessä tarkastetaan myös FIFO-statusrekisterin muistin vesileimastatus, joka kertoo muistin sisältävän enemmän datapistepaketteja kuin määritetty vesileima. Status luetaan, sillä transient-keskeytyksen painoarvo on suurempi kuin FIFO-keskeytyksen. Jos transient-keskeytyksiä tulee suuremmalla tiheydellä kuin FIFO-keskeytyksiä ja vesileimastatusta ei lueta, voi data hävitä. [3]

Lukuprosessi aloitetaan lukemalla FIFO-statusrekisteristä datapakettien määrä. MMA8652:n FIFO-muistia käytettäessä kaikki kiihtyvyysdata luetaan samasta rekisteristä, joka osoittaa tiettyyn muistin paikkaan. Rekisteriä luetaan kolmin- tai kuusinkertaisesti FIFO-statusrekisterin antaman arvon verran sen mukaan, luetaanko kiihtyvyysdata 8- vai 12-bittisenä. 12-bittinen kiihtyvyysdata luetaan kuudessa paketissa tai 8-bittinen kiihtyvyysdata kolmessa paketissa. Näissä järjestys on x-akseli, y-akseli ja z-akseli. 12-bittinen data löytyy kahdesta rekisteristä ja näiden 16-bittisestä jonosta merkitsevimmästä bitistä viidenneksi vähiten merkitsevään bittiin. [3]

Jotta kiihtyvyysanturin säätöä voidaan helpottaa, kiihtyvyysanturin merkitsevien rekisterien muokkaamiseen ohjelmoidaan säädettävyys tietokoneen näppäimistöllä. Eri näppäimet muokkaavat eri rekisterien arvoja tiettyyn suuntaan, eli esimerkiksi painamalla Q-näppäintä transientin raja-arvorekisterin arvo kasvaa yhdellä maksimiarvoonsa asti.

## 6 MITTAUKSET

Hakkuri tuotti 2,5 V jännitteen, mutta kuorman alaisena jännite putosi hetkellisesti alle 1,8 V:n. Tämä aiheutti ATmega:n jatkuvan resetoitumisen, sillä brown-out detection oli asetettu 1,8 V:iin. Brown-out detection asettaa prosessorin reset-tilaan, kun käyttöjännite putoaa alle asetetun arvon. Ongelman syy ja korjaus ilmeni luvussa 4 Prototyypin kokoaminen. Suuri käyttöjännitteen suodatus vähensi hakkurikelan kuormitusta virtapiikeissä. Korjaus on tässä vaiheessa tilapäinen, sillä hakkurikela voidaan vaihtaa.

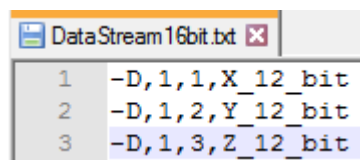
USB-linjan kautta ladattaessa akku latautui sen nimelliseen maksimijännitteeseen 4,2 V:iin. Latauspiiri sytytti halutusti ledin, joka ilmaisi näin maksimijännitteen saavuttamisen. Akun kuormitus oli muutamista sadoista mikroampeereista kymmeniin milliampeereihin riippuen tehtävästä työstä.

Radiolinkki ei toiminut aluksi ollenkaan. Syynä tähän oli baluunin yhden pinnin kiinnitys käyttöjännitteeseen. Kun sen kytki maihin, radiolinkki toimi, mutta kantomatka oli erittäin lyhyt. Lähetin-vastaanottimen sisältämässä vastaanottoenergiaa ilmaisevassa mittauksessa, jossa tasopykälä on 85, vierekkäin asetetut lähetin-vastaanottimet ilmaisivat maksimissaan 30 yksikköä. Tämä tarkoittaa noin -60 dBm:n tehoa [6], joka oli huomattavasti vaimentunut, kun lähetysteho oli +3,5 dBm. Yhteys katkesi 1–2 m:n etäisyydellä. Esimerkiksi parempi maataso asettelu RF-linjojen lähistöllä voisi parantaa etäisyyttä.

Infrapuna- ja audioanturin toimivuus testattiin vain mittamalla mikroprosessorin analogiamuuntimella jännitteet eri voimakkuuksilla. Molemmat todettiin toimiviksi: anturien jännite kasvoi suoraan verrattuna mitattavien suureiden volyyymiin. Infrapuna-anturi toimi myös näkyvän valon alueella suuren emitterivastuksen kanssa.

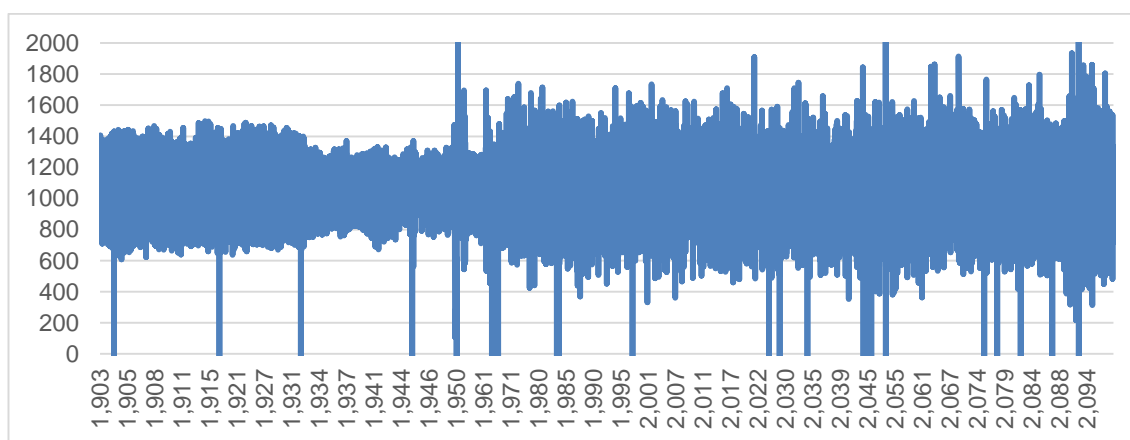
Kiihtyvyyksimittauksessa käytettiin hyväksi Atmelin Data Visualizer -ohjelmaa. Data syötettiin USB:n kautta tietokoneen virtuaaliseen sarjaporttiin, jonka Data Visualizer tulkkasi visuaaliseen muotoon. Ohjelma kykenee myös luomaan lokitietoja. 12-bittinen eri akselien anturidata siirrettiin kahdessa oktetissa,

jokainen akseli peräkkäin, ja rajamerkeiksi asetettiin sattumanvaraisesti määritetty numero ja sen inversio paketin molemmiin puolin. Kuvassa 10 näkyy Data Visualizerin alustukseen vaadittava datantulkkaustekstitiedosto, jossa rivien lukumäärä tarkoittaa yhden paketin datamäärää ja  $-D$  datan kokoa eli etumerkkistä 16-bittistä muuttujaa. Rivien muut informaatiot eivät ole relevantteja datan tulkkamiseen.



Kuva 10. Data Visualizer –ohjelman alustus.

Kiihtyvyysanturin toimintaa testattiin ensiksi protoa naputtaen. Tällä saatiin informaatiota mittausliipaisuvoimakkuudesta, jota voitiin säätää kiihtyvyysanturin transient threshold- ja transient count -rekistereistä. Herkimmillään pieni kosketus protoon aiheutti keskeytysliipaisuun, kun taas lujimmillaan laitetta joutui heiluttamaan voimakkaasti liipaisuun tuottamiseksi. Herkkyyteen vaikutti myös näytteenottotaajuus, joka oli verrannollinen transient count -rekisterin arvoon. Tämä johtuu siitä, että transient count -rekisteri ilmaisee keskeytysliipaisuun tarvittavien transientin raja-arvon ylitysten määrän. Jos näytteitä otetaan pienemmällä taajuudella, ylityksiä pitää tuottaa pidemmällä aikavälillä, jolloin liipaisu aiheutuu vain pitkän yhtäjaksoisen värähtelyn tuloksena.



Kuvio 5. Levytyökeskuksen kylkeen kiinnitetyn kiihtyvyysanturin z-akselin dataa, pystyakselilla mg-voimat ja vaakakselilla sekunnit.



Kuvio 6. Kuvion 5 tarkennus ajasta 1 904 s – 1 905 s, pystyakselilla mg-voimat ja vaakakselilla sekunnit.

Kuvioissa 5 ja 6 on kiihtyvyydataa levytyökeskuksen kyljestä. Levytyökeskuksen tekemän työn aiheuttama värähtely on anturiin saapuessa hieman vaimentunut anturin asetuspaikan vuoksi. Kuvioista 5 ilmenee kuitenkin eri työvaiheiden aiheuttamien värähtelyjen eroavaisuus. Työvaiheet vaihtuvat ainakin kohdissa noin 1 934 ja 1 971. Näytetaajuus kuvioissa on 800 Hz ja mitattava kiihtyvyyalue  $\pm 2 g$ . Suuret piikit, jotka ylittävät kuvioiden rajat, ovat ohjelman tuottamia virheitä, joiden alkuperä saattaa olla protokortin datantuotossa tai muistinkäsittelyssä taikka Data Visualizer -ohjelman tulkkauksysteemissä. Aikamääre on Data Visualizer -ohjelman aloituksesta sekunteja.

## 7 POHDINTA

Käytetystä kiihtyvyysanturista saatiin huomattava määrä tietoa protokortin avulla. Erilaisilla konfiguraatioilla sitä voidaan käyttää monenlaisissa kohteissa, esimerkiksi iskujen laskemisessa, yleisessä käyttöasteen mittauksessa tai koneen liikkuvuudessa. Liikkuvuusdatan tulkitsemiseen vaaditaan kuitenkin huomattava määrä pohjastatistiikkaa pitkältä aikaväliltä, jotta esimerkiksi virheiden huomaaminen onnistuu tai iskujen löytyminen onnistuu. Erilaisten algoritmien avulla haluttu informaatio voidaan datasta löytää. Ongelmana saattaa esiintyä datan määrä, sillä esimerkiksi 20 anturia keskeytymättömässä mittauksessa 800 Hz:n näytetaajuudella ja 12-bittisellä tarkkuudella kerryttävät 1 s:ssa dataa 96 kB. Tämä tarkoittaa, että dataa kertyy noin 5,8 MB/min ja jopa noin 8,3 GB/vrk. Dataa tulee huomattavasti enemmän, kun siihen lisätään vielä ylätunnisteet ja rajamerkit. Näytetaajuutta voi kuitenkin laskea reilusti käyttökohteen mukaan. Lisäksi anturin korkearesoluutiomoodi mahdollistaa hyvinkin pienen näytetaajuuden esimerkiksi iskujen huomaamiseksi. Esimerkiksi erään levytyökeskuksen maksimi-iskunopeus 5/s, jolloin 10 Hz:n näytteenottotaajuus saattaa jo riittää iskujen huomaamiseen. Jokainen anturi on siis säädettävä erikseen käyttökohteen mukaan.

Anturin sijoituskohta on huomattavan tärkeä, sillä esimerkiksi robotin käsivarteen kytketty kiihtyvyysanturi voi näyttää erittäin tarkasti varren liikesuunnan ja -nopeuden. Anturilaitteen toivoisi olevan pienempi, jotta asentaminen ahtaisiin paikkoihin olisi helpompaa. Protoa ei pystytty kytkemään hankaliin paikkoihin, vaikka koon puolesta se olisi voitu jonnekin uskaltaa laittaa. Syy tähän oli radio-osan riittämätön toimivuus, minkä vuoksi laitteen piti olla jatkuvasti kiinni tietokoneessa johdon kautta kommunikaatiota varten. Radio-osalla on suuri vaikutus laitteen käytännöllisyyteen, joten sen kehitykseen kannattaa panostaa jatkossa tai käyttää erillistä radiomoduulia, kuten Digin XBee-moduulia.

Akun jännitteen mittaaminen oli tarkoitus tehdä mikroprosessorilla, mutta jossain kohdassa levyn kehitystä sen vaatima kytkentä jäi pois. Akun suojaamiseksi alijännitteeltä ei protossa ole siis minkäänlaista kytkentää, joten vaarana on akun



niin kutsuttu kuoleminen. Li-Po-akkuja ei tulisi päästää alle 3 V:n. Alijännitesuojia on myös erillisissä integroiduissa piireissä, joiden käyttö voisi olla suotavaa. Akun kestoon vaikuttaa eniten radiolähtetimen käyttö. Akku tulee myös ehdottomasti kytkeä oikein, sillä väärän polariteetin suojakytkentää akulle ei ole implementoitu protossa.

Mikrofonin käyttötarve ei selkiytynyt täysin projektin edetessä. Ideana oli käyttää sitä iskujen laskemiseen, mutta samaan pystyy myös kiihtyvyysanturi. Jos kyseessä on kuitenkin asia, joka pitää kovaa ääntä, muttei juurikaan värähtele, mikrofoni voisi olla toimivampi anturi kuin kiihtyvyysanturi, esimerkkinä hitsaus. Potentiaalisia käyttökohteita voi olla myös esimerkiksi yleisen tai työkoneen melutason mittaus.

Infrapuna-anturin käyttökohteeksi pohdittiin esimerkiksi tuotettujen kappaleiden laskemista. Mittauksia ei tältä osin tehty, mutta potentiaalia siihen löytyy. Saman työn voi myös tehdä tavallisen valon mittausanturi, joka saattaisi toimia myös esimerkiksi yleisen valotason mittauksessa. Liian hämärässä tai valoisassa työskentely saattaa vaikuttaa työntekijän mielialaan ja jopa fyysiseen ja psyykkiseen hyvinvointiin, mikä vaikuttaa suoraan työn laatuun.

Mahdollisia lisäantureita Smart Factory -järjestelmään voisivat olla esimerkiksi kosteus- ja lämpötila-anturit tai ilmanlaatuanturit. Lisäksi erillisen kalenteripiirin avulla laite voisi toimia esimerkiksi tehtaan summerijärjestelmän hallinnassa. Lopullinen laite voisi olla siis modulaarinen, jolloin eri antureita voisi liittää tarpeen mukaan järjestelmään. Tämä tarkoittaa sitä, että erikseen olisi RF-moduuli, joka kytkettäisiin joko ulkomaailmaan kytkettävään moduuliin tai anturimoduuliin. RF-moduuli sisältäisi radio-mikroprosessori-kombinaation. Anturikortti voisi sisältää yhden tai useamman anturin tai muita haluttuja funktioita esimerkiksi kalenteripiiriin. Ulkomaailmaan kytkettävän moduulin kommunikaatio voisi toimia esimerkiksi Ethernetin, GSM:n tai vaikka tässä työssä käytetyn USB-sarjaporttimuuntimen avulla.

## 8 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja valmistettiin prototyyppilaite Smart Factory -tuotannonvalvontajärjestelmään. Prototyyppiä varten suunniteltiin PP42N-koteloon sopiva piirilevy, jossa oli kolme eri anturia, mikroprosessori, Li-Po-akun latauskytkentä, USB-liityntä ja langaton kommunikaatioväylä. Prototyyppiä varten kirjoitettiin testiohjelma eri toimintojen testausta varten. Laite asennettiin levytyökeskukseen ja kerättiin siitä kiihtyvyyssdataa. Suunnittelun apuna käytettyjä ohjelmistoja olivat: Mentor Graphics PADS, Atmel Studio ja Atmel Data Visualizer.

Opinnäytetyö toimii Smart Factory -tuotantovalvontajärjestelmän anturiosan kehityksen pohjatyönä, jonka tuloksia käytetään seuraavien prototyyppien suunnittelussa. Prototyypin avulla saatiin informaatiota antureiden toiminnasta, kommunikaatorajapinnoista, langattoman yhteyden luonnin ongelmista ja akun toiminnasta. Lisäksi kehitetyt ohjelmapätkät esimerkiksi kommunikaatorajapinnoista tai antureiden käyttöohjelmista voidaan hyödyntää jatkokehityksessä. Jatkokehityksessä tulisi keskittyä langattoman yhteyden ja verkon kehitykseen, datan käsittelyyn ja turhan datan sivuuttamiseen, virrankulutuksen minimointiin sekä uusien antureiden testaamiseen.

## LÄHTEET

[1] Stera Technologies Oy. [www-dokumentti] Saatavilla:

<http://stera.com/> (Luettu 13.3.2016).

[2] "Xtrinsic FXLN83xxQ 3-Axis Low-Power Analog-Output Accelerometer", Freescale Semiconductor Inc., NXP Semiconductors Netherlands B.V., High Tech Campus, 605656 AG Eindhoven, The Netherlands.

[3] "MMA8652FC, 3-Axis, 12-bit, Digital Accelerometer", Freescale Semiconductor, Inc., NXP Semiconductors Netherlands B.V., High Tech Campus, 605656 AG Eindhoven, The Netherlands.

[4] "MP23AB02B MEMS audio sensor high-performance analog bottom-port microphone" STMicroelectronics, Geneva, Switzerland.

[5] "SFH 325, SFH 325 FA", Osram GmbH, Marcel-Breuer-Straße 680807 Munich, Germany.

[6] "ATmega256/128/64RFR2, 8-bit AVR Microcontroller with Low Power 2.4GHz Transceiver for ZigBee and IEEE 802.15.4", Atmel Corporation, 1600 Technology Drive, San Jose, California 95110, United States.

[7] "FT230X USB TO BASIC UART IC", Future Technology Devices International Ltd, Unit 1, 2 Seaward Place, Centurion Business Park, Glasgow, G41 1HH, United Kingdom.

[8] "UM10204 I2C-bus specification and user manual", NXP Semiconductors, NXP Semiconductors Netherlands B.V. High Tech Campus 605656 AG Eindhoven, The Netherlands.

[9] Paristojen tietolehdet:

"SLPB 353452", Kokam, 30-78 1220 beongil Gyeonsu-Daero Jangan-Gu Suwon-si, Gyeonggi-Do Korea (19-4 Pajang-Dong) Zip. 440-851.

"ENERGIZER CR2032", Energizer, 533 Maryville University, St. Louis, MO 63141, United States.

"ENERGIZER NH15-2300", Energizer, 533 Maryville University, St. Louis, MO 63141, United States.

"ENERGIZER EN91", Energizer, 533 Maryville University, St. Louis, MO 63141, United States.

[10] "bq24010, bq24012 bq24013, bq24014, bq24018, Single-Chip, Li-Ion Charge Management IC for Handheld Applications ( bqTINY™)", Texas Instruments, 12500 TI Boulevard, Dallas, Texas 75243, United States.

[11] *Universal Serial Bus Specification Revision 2.0*, USB IF, 27.4.2000.

[12] "TPS6220x High-Efficiency, SOT23 Step-Down, DC-DC Converter", Texas Instruments, 12500 TI Boulevard, Dallas, Texas 75243, United States.

[13] Trace width calculator [www-dokumentti]. Saatavilla:

<http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator> (Luettu 13.3.2016).

[14] Normal Condition of PCB capabilities [www-dokumentti]. Saatavilla:

<http://support.iteadstudio.com/support/solutions/articles/1000156313-normal-condition-of-pcb-capabilities> (Luettu 13.3.2016).

[15] “PP42”, Supertronic, S.A., c/ Prat de la manta, 19 Bajos. 08902 - L’Hospitalet de Llobregat. Barcelona (España).

[16] Heikkinen N., *MSP430 ja kiihtyvyyssanturi*, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2012